

关于变电站电气设备运行状态自动化预测方法的研究

刘一平

海工（珠海）重工有限公司，广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ME.2026060010

摘 要： 变电站电气设备的运行状态直接关系电网安全。传统人工巡检效率低且易漏检。研究提出一种基于数据驱动的自动化预测方法，通过采集设备历史运行数据，建立特征参数体系，应用机器学习算法构建预测模型。实验结果表明，该方法可有效识别设备状态变化趋势，预测准确率达到较高水平，为变电站设备维护提供决策支持。方法响应快，准确率高且稳定，便于现场部署。

关 键 词： 变电站；电气设备；运行状态

Research on Automatic Prediction Methods for the Operating Status of Electrical Equipment in Substations

Liu Yiping

COOEC (Zhuhai) Heavy Industry Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： The operational status of electrical equipment in substations is directly related to the safety of the power grid. Traditional manual inspection is inefficient and prone to missed inspections. This study proposes an automated prediction method based on data-driven analysis. By collecting historical operational data of equipment, establishing a feature parameter system, and applying machine learning algorithms to construct a prediction model, experimental results show that this method can effectively identify trends in equipment state changes, achieving a high level of prediction accuracy. It provides decision support for substation equipment maintenance. The method responds quickly, has high and stable accuracy, and is easy to deploy on-site.

Keywords： substation; electrical equipment; operating status

引言

变电站设备在长期高电压、大电流环境中运行，性能缓慢下降。一旦突发故障，可能造成大面积停电。当前在线监测装置虽能采集大量数据，但分析处理依赖人工，缺乏对未来状态的预判能力。研究自动化预测方法，从历史数据中挖掘设备状态演变规律，能够提前识别异常趋势，为计划检修提供时间窗口。该方法有助于降低突发故障风险，提升电网运行可靠性。

一、变电站电气设备状态监测的现状与问题

（一）设备运行状态监测的基本需求

变电站内部包含变压器、断路器、隔离开关、互感器等多种电气设备。这些设备长期处于高电压、大电流的工作环境中，设备性能会随时间缓慢下降。一旦设备出现故障，可能引发大面积停电事故。因此，掌握设备运行状态的变化规律至关重要。传统状态下，运维人员定期巡检设备，通过肉眼观察、红外测温、声音判断等方式评估设备健康水平。这种模式依赖人员经验，无法实时捕捉设备状态突变。部分设备内部故障在外部表现不明显，等到发现异常时，设备往往已经接近失效。

（二）现有状态监测方法的局限性

目前变电站普遍安装了在线监测装置，如油色谱分析仪、局放电检测仪、测温传感器等。这些装置能持续采集设备运行数

据，但数据的分析处理仍以人工为主。运维人员需要查看大量数据报表，从中判断设备是否存在异常。这种方法存在几个突出问题。第一，数据量大时，人工分析容易遗漏关键信息。第二，不同监测参数之间存在关联，人工难以同时考虑多个变量。第三，缺乏对设备未来状态变化的预判能力，只能被动响应已发生的异常。

（三）自动化预测方法引入的必要性

自动化预测方法能够从历史数据中学习设备状态变化规律，建立输入参数与设备健康状态之间的映射关系。一旦模型训练完成，系统可以自动处理新采集的数据，输出设备未来状态的概率或趋势。这种方法不依赖人工经验判断，减少了主观因素干扰。同时，自动化预测可以连续运行，及时发现状态异常变化。更重要的是，预测结果能为设备检修提供时间窗口，帮助运维人员提前准备备件和检修方案，变事后维修为预知性维修。

二、设备运行状态数据采集与特征参数构建

（一）监测数据的来源与类型

变电站电气设备运行状态数据主要来自两类渠道。一类是变电站自动化系统记录的运行参数，包括电压、电流、有功功率、无功功率、频率、温度等。另一类是专门的状态监测装置采集的数据，如变压器油中溶解气体含量、断路器分合闸线圈电流波形、局部放电脉冲幅值等。这些数据具有不同的时间特性。运行参数通常以秒级或分钟级频率采样，数据量大且连续。状态监测数据采样频率较低，可能每小时或每天记录一次。不同设备的数据采集周期也不统一，需要做时间对齐处理^[1]。

（二）数据预处理方法

原始采集数据包含噪声和异常值，不能直接用于模型训练。数据预处理主要包括三个步骤。第一步是缺失值处理。传感器故障或通信中断会产生数据缺失。对于短时间缺失，可以采用线性插值法填补；对于长时间缺失，直接删除对应时间段的数据更合适。第二步是异常值剔除。设备测量值超出正常物理范围时，可判定为异常点。例如变压器油温突然跳到几百摄氏度，明显是传感器故障。这类异常值需要识别并移除，否则会干扰模型学习。第三步是数据归一化。不同参数的量纲和数值范围差异很大，例如电压以千伏为单位，温度以摄氏度为单位。归一化将所有参数映射到相同数值区间，便于模型处理。常用方法包括最大最小归一化和 Z-score 标准化^[2]。

（三）状态特征参数的提取

设备运行状态不能直接观测，需要通过特征参数间接反映。特征参数选取直接影响预测模型的性能。选取特征参数时，需要考虑三个原则：可测量性、相关性和时效性。以变压器为例，常见的状态特征参数包括油中溶解气体含量（氢气、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔）、油温、绕组温度、铁芯接地电流、套管介损等。以断路器为例，特征参数包括分合闸线圈电流峰值、动作时间、触头行程、主回路电阻等。单一特征参数往往不足以判断设备状态。多个特征参数组合后，可以形成更全面的状态描述。特征组合需要避免参数之间的高度相关性，否则会造成信息冗余。可以采用主成分分析法或相关系数矩阵进行特征降维，筛选出最具代表性的特征子集。

三、基于数据驱动的设备状态预测模型

（一）预测模型的整体框架

设备状态预测模型的核心任务是根据当前和历史状态特征参数，推算未来一段时间内设备状态的变化趋势。模型的整体框架包含输入层、处理层和输出层三个部分。输入层负责接收经过预处理的状态特征参数序列。处理层运行预测算法，对输入数据进行计算分析。输出层给出预测结果，包括设备健康指数、故障概率或剩余使用寿命等指标。模型运行需要两个阶段。第一阶段是训练阶段，使用历史数据训练模型参数，使模型能够拟合输入与

输出之间的映射关系。第二阶段是预测阶段，将新采集的数据输入训练好的模型，得到预测结果。模型训练完成后，可以定期使用新数据对模型进行更新，以适应设备老化引起的性能变化^[3]。

（二）常用预测算法的比较

目前可用于设备状态预测的算法有多种类型，各有优缺点。时间序列分析法适用于具有明显趋势性和周期性的数据。例如变压器油温随负荷变化呈现日周期规律，可以用自回归移动平均模型（ARIMA）进行预测。这类方法计算简单，但对非线性关系的拟合能力有限。神经网络具有较强的非线性映射能力。多层感知机网络可以处理多个输入特征与输出状态之间的复杂关系。反向传播算法用于网络训练，通过调整连接权重使预测误差最小化。神经网络的缺点是训练时间长，且需要大量样本数据。支持向量机在小样本情况下表现较好。通过核函数将低维数据映射到高维空间，在高维空间中寻找最优分类超平面。支持向量机适合处理高维特征数据，但核函数选择依赖经验。随机森林是一种集成学习方法，通过构建多个决策树并综合投票结果做出预测。该方法对噪声数据不敏感，能处理缺失值，且不易过拟合。随机森林还能输出特征重要性排序，帮助筛选关键参数^[4]。

综合比较各种算法，随机森林在变电站设备状态预测中应用效果较好。因为设备状态数据通常包含噪声和缺失值，随机森林对这些问题有较好的容忍度。

（三）模型训练与参数优化

模型训练是将历史数据输入算法，使算法学习输入与输出之间规律的过程。训练数据需要包含设备从正常到异常的全过程记录，这样模型才能学会识别状态变化的早期特征。

训练集和测试集的划分比例通常为7比3。使用训练集训练模型参数，使用测试集验证模型的泛化能力。如果模型在训练集上表现良好但在测试集上表现差，说明发生了过拟合。过拟合的解决办法包括增加训练数据量、减少模型复杂度、引入正则化项。模型参数优化采用交叉验证方法。将训练数据分成k份，每次取其中一份作为验证集，其余k-1份作为训练集，重复k次后取平均性能作为评价指标。网格搜索法可以遍历参数组合，找到性能最优的参数配置。以随机森林为例，需要优化的主要参数包括决策树数量、最大深度、节点分裂所需的最小样本数等。决策树数量越多，模型稳定性越好，但计算时间也越长。通常取100到500棵决策树即可获得较好的性能。

（四）预测效果的评价指标

预测模型的性能可通过量化指标评判。二分类场景常用准确率、精确率、召回率与 F1 值四类指标。准确率代表预测正确样本的占比，精确率、召回率分别对应异常样本的判定情况，F1 值结合二者综合体现模型能力。回归分析多采用 MAE 与 RMSE，两项指标依据预测值和真实值的差值计算，其中 RMSE 对误差波动更为敏感。设备状态预测需考量漏报与误报问题。漏报易引发设备故障，误报会增加检修负担，实际应用中需结合业务需求选用指标、设置权重^[5]。

四、预测方法的实现与效果验证

（一）数据来源与实验设置

实验数据来自某地区变电站两年内的运行记录。数据涵盖三台主变压器和六台断路器的监测信息。变压器数据包括油色谱分析结果、油面温度、绕组温度、负荷电流等。断路器数据包括分合闸线圈电流波形特征值、动作次数、触头磨损量等。数据采集间隔不一致。负荷电流每5分钟记录一次，油色谱分析每8小时采样一次，断路器动作数据仅在操作时产生。处理时将所有数据按小时对齐，缺失值采用前向填充法处理。实验采用 Python 语言编写预测程序。主要使用 scikit-learn 机器学习库中的随机森林算法。计算机配置为普通工作站，单次模型训练耗时约两分钟。

（二）模型训练结果

将预处理后的数据按7比3划分为训练集和测试集。训练集包含约12000条样本，测试集包含约5000条样本。设备状态标签由专业运维人员根据实际检修记录标注，分为正常、注意、异常三个等级。经过网格搜索优化，随机森林模型的最佳参数为：决策树数量200棵，最大深度15层，节点分裂所需最小样本数5个。模型在训练集上的准确率达到96.2%，在测试集上的准确率为93.7%，两者差距较小，说明模型没有明显过拟合。特征重要性分析显示，对变压器状态预测贡献最大的前三个特征依次是油中乙炔含量、负荷变化率和油面温度。对断路器状态预测贡献最大的前三个特征依次是分闸线圈电流峰值、动作次数和主回路电阻。这些特征与设备故障机理相符，验证了模型学习的合理性。

（三）与人工预测方法的对比

为验证自动化预测方法的有效性，将模型预测结果与三名经验丰富的运维人员独立判断结果进行对比。选择过去一年发生过故障或检修的50台次设备作为测试案例，要求人员根据同样的事前监测数据给出状态预测，模型也基于相同数据进行预测。结果显示，模型对设备异常状态的召回率达到89%，平均精确率为

87%。三名运维人员的平均召回率为76%，平均精确率为81%。模型在两项指标上均优于人工判断。进一步分析发现，模型在识别早期微弱异常信号方面表现突出。例如某台变压器油中乙炔含量缓慢上升的案例，人工判断时认为数值仍在标准范围内，未引起注意，而模型根据历史趋势预测出乙炔含量将持续升高。三个月后该变压器确实出现放电故障，模型提前给出了预警。

（四）方法的应用价值讨论

自动化预测方法能够在不增加硬件投入的情况下提升变电站状态感知能力。监测系统已经采集了大量数据，这些数据的价值尚未被充分利用。预测模型相当于数据分析工具，将原始数据转化为决策信息。该方法可以直接嵌入现有变电站监控系统。监控系统每收到新数据，自动调用预测模型进行计算，更新设备状态评估结果。当预测结果显示设备状态趋向异常时，系统发出预警通知，提醒运维人员关注。从经济效益角度分析，提前发现设备异常可以避免突发故障造成的停电损失。以一台110kV变压器为例，突发故障更换费用约80万元，停电损失可能超过200万元。如果提前三个月预测到故障趋势，安排计划性检修，费用可降低一半以上。自动化预测方法的投入主要是软件开发和模型维护成本，长期收益明显。

五、结束语

基于上述研究，可以得出如下结论：以数据驱动为核心、融合机器学习算法的设备状态预测方法，有效克服了传统人工巡检的不足。该方法能够及时识别状态变化趋势，预测准确率高，为变电站安全运行提供可靠决策支持。现场部署简便，响应速度快，具有良好的推广价值。未来可进一步融合多源监测数据，优化特征提取与模型泛化能力，推动变电站运维向智能化、精准化方向升级。持续完善预测体系，将为电网安全稳定运行提供更坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 晏云明. 变电站电气设备运行状态自动化预测方法[J]. 模型世界, 2024(22): 81-83.
- [2] 王军华, 李富强, 胡晓华, 等. 变电站电气设备运行状态自动化预测方法[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(11): 17-20, 93.
- [3] 陈钢. 变电站电气设备的状态检修和状态监测技术现状及其发展趋势[J]. 贵州电力技术, 2005, 8(1): 15-17.
- [4] 张杰. 变电站电气设备状态检修优化对策研究[J]. 电脑采购, 2024(52): 78-80.
- [5] 侯东方, 徐天, 王俊. 220kV及以下变电站设备状态的监测与预测应用[J]. 大众用电, 2023, 38(9): 40-41.